

■ 研究紹介

RHIC と PHENIX 実験

KEK 素粒子原子核研究所

秋葉康之

akiba@bnl.gov

2000年6月26日

1. はじめに

2000年6月12日夜、BNLの高エネルギー重イオン加速器 RHICにおける最初のビーム同士の衝突が観測された。ビームは核子当たり約 30 GeV の金原子核で、重心系の全エネルギーが約 12 TeV の世界最高エネルギーの衝突である。これは、約 10 年にわたって建設が推進されてきた RHIC がついにその衝突加速器としての能力を発揮した記念すべき瞬間であり、私たち高エネルギー重イオン物理の研究者にとっては新時代の開幕である。

最初のビーム・ビーム衝突事象は午後9時頃 STAR 測定器で観測され、つづいて13日午前2時ころ PHOBOS 測定器でも観測された。2日後には、他の2衝突点でもビーム・ステアリング調整が行われ、15日に PHENIX 測定器では午前6時頃、BRAHMS 測定器では午後11時頃に衝突が確認され、これで RHIC の4実験すべてでビーム衝突が確認されたことになる。

RHICは Relativistic Heavy Ion Collider の略称で、重イオンを高エネルギーで衝突させる超電導衝突型加速器である。核子当たり 100 GeV、全エネルギー約 20TeV の ^{197}Au 原子核のビーム同士を2重リング内に反対方向に加速・正面衝突させ、重心エネルギー40 TeV の反応を起こすことが出来る。1991年以來、BNLの尾崎敏氏のもとで建設が行われてきた。1999年春に2本のリングが完成・試験運転が行われ、同年10月には dedication(開所式典)が行われた。今年2月から最初の物理実験のためのコミッショニングが開始され、今回ついに最初の衝突に成功した。

RHICの主要実験の一つである PHENIX 実験には、多くの日本人研究者が日米の国際科学協力事業として参加し、長年測定器の開発・建設に従事してきた。その中の一人として、RHICの最初の衝突を機会に RHIC と PHENIX 実験の現状を紹介・報告したい。第2節で、RHICの目的、第3節で RHIC 加速器について紹介する。第4節で RHIC での物理について私なりの解説を試みた後、第5節で PHENIX 実験について測定器の構成と現状を紹介する。最後に第6節では、今年初めから今回最初のイベントを観測するまでの PHENIX 実験の様子を報告したい。

2. 目的 QGP の探索

この「高エネルギーニュース」の読者の多くは素粒子物

理学の研究者なので、「なぜ原子核などという複雑なものをぶつけるのか？」という疑問をお持ちなのではないかと思う。確かに、素粒子同士の相互作用の短距離での振る舞いを研究するためには、原子核衝突は適当な方法ではない。原子核同士を超高エネルギーで衝突させるのは、それによって広い空間に高温・高エネルギー密度の状態を作り出すためである。

Lattice QCD は、系のバリオン密度がゼロの場合、十分に高い温度・エネルギー密度では「quark 閉じ込め」が破れ、quark gluon plasma (QGP) への相転移が起こると予想している[1,2]。バリオン密度がゼロでない場合は lattice QCD の計算が困難なために明確な予想はないが、現象論的モデルから、十分に高バリオン密度の場合も QGP への相転移が起こると予想されている。図1はこうした予想と予想に基づく QCD の phase diagram の概念図である。図の横軸はバリオン密度、縦軸は温度で、通常の核物質は $T=0$ 、密度 $\mu^B=1$ の点で示されている。物質の温度を上げるか、バリオン密度を高めると QGP への相転移が起こり、その結果、quark や gluon が広い空間(数 fm 以上)をほぼ自由に飛びまわるようになり、またカイラル対称性が回復して quark の実効質量がその current mass となる。最近の lattice QCD 計算によれば、通常真空から QGP 状態への相転移は、バリオン密度がゼロの場合は温度が約 170 MeV、エネルギー密度が約 $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ で起こると予想されている。

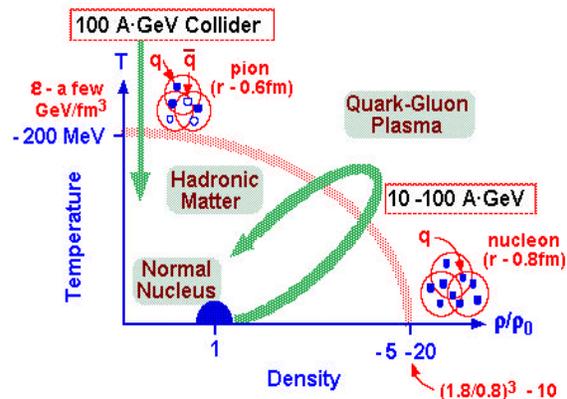


図1 強い相互作用の phase diagram (概念図)

もし人工的に QGP への相転移を実現できれば、それは lattice QCD の予想の非摂動論的領域での検証になり、QCD 真空構造の研究・閉じ込め機構の解明に役立つと考え

られる。また、Big Bang 後、数 μ s までの宇宙は QGP 相にあったと考えられるので、QGP の実現は、宇宙の初期状態を再現してその発展を実験的に検証する可能性を開くものになる。

人工的に QGP への相転移を起こすには、大きな原子核同士を超高エネルギーで衝突させることがもっとも有効な方法と考えられる。陽子・反陽子衝突反応では、反応領域のサイズが 1 fm 程度と小さい。重い原子核 ($A = 200$ 程度) 同士の衝突であれば、半径 6 f m 程度、容積にして数 100fm^3 の大きさの超高温状態を作り出せる。RHIC の目的は、超高温状態を広い空間に生み出し、それにより QGP への相転移を実現してその性質を研究しようというものである。これはいわば人工的に mini-Bang を作り出し、宇宙創生の初期状態を再現しようという試みであり、RHIC が “Hubble Telescope of Nuclear Physics” と呼ばれる所以である。

1980 年代の後半以来、BNL の AGS と CERN の SPS でそれぞれ核子当たり 11 - 15 GeV ($\sqrt{s} \sim 5$ A GeV)、158 - 200 GeV ($\sqrt{s} \sim 17 - 19$ A GeV) の高エネルギー重イオンビームが加速され、それによる QGP 探索が行われてきた。AGS や SPS のエネルギー領域では、中心ラピディティ付近に高いバリオン密度の状態が作られる。もしここで QGP が形成されるとしたら、図 1 に「10 - 100 A GeV」と書かれた U-ターンしている矢印が示すように、高バリオン密度の QGP が形成されると考えられる。これに対し、RHIC のエネルギー領域では、衝突する 2 つの原子核中のバリオンが互いにほとんどすり抜け、その間の中心ラピディティ領域にはバリオン密度がほとんどゼロの QGP を生み出すことが出来ると考えられる。図 1 に「100 A GeV Collider」と書かれている下向きの矢印が、この RHIC で予想される QGP から通常のハドロン物質への相転移を示している。

今年 2 月に、CERN で過去 6 年間の SPS での Pb ビーム実験の成果を総括する特別セミナーがあり、そこで「新物質状態」発見の発表がされたことをご記憶の方も思う。 (<http://www.cern.ch/CERN/Announcements/2000/NewStateMatter>) CERN の実験結果は、QGP が形成されたと解釈出来る多くの有力な間接証拠を見つけたとはいえ、確実に QGP が発見できたとはまだ結論していない。RHIC の衝突最高エネルギーは核子対当たり 200 GeV であり、SPS でのエネルギーの 10 倍以上に達する。このため、RHIC の Au + Au 衝突では、SPS の Pb + Pb 衝突に比べて数倍のエネルギー密度を達成出来ると予想される。CERN の発表でも指摘されているように、QGP の明確な証拠を捉え、その存在を実証するには RHIC での実験が必要であると考えられている。もし SPS で QGP 形成の兆候が見えていずれば、RHIC では QGP への相転移を確実に観測でき、その性質を詳細に研究出来るはずである。

3 . RHIC 加速器

図 2 に、RHIC とそれにいたる一連の BNL の加速器コンプレックスを示す。RHIC 加速器は青リング、黄リングと呼ばれる周長約 3.8 km の 2 つの超電導加速器リングからなる。この 2 つのリングが 6 箇所の衝突点で交差し、そこでビーム同士が衝突角 180 度で衝突する。現在、6 箇所の衝突点のうち 4 箇所に実験装置が設置されている。4 個の実験のうち 2 つは PHENIX と STAR という大規模実験であり、残りの 2 つは PHOBOS, BRAHMS という比較的小規模な実験である。



図 2 RHIC ・AGS 加速器コンプレックスの全景写真 (Brookhaven National Laboratory 提供)

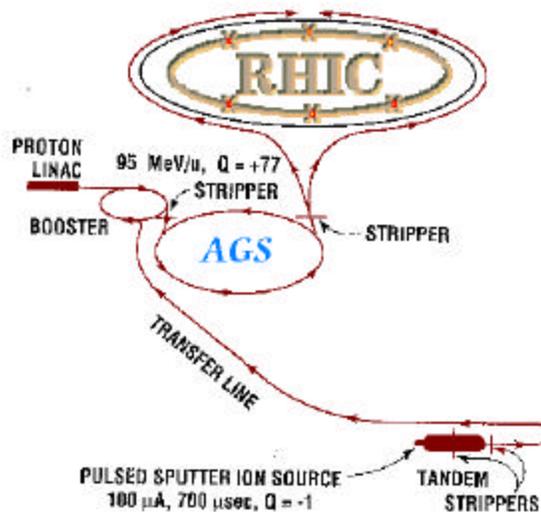


図 3 RHIC での Au イオンの加速

RHIC では、金原子核 ($A=197$) から陽子 ($A=1$) までの多くの原子核を加速・衝突させることが出来る。また、p+Au 原子核のように異なるビーム同士の衝突も出来る。これにより、p+p での「素過程」の測定から p+A での通常の原子核効果の研究、A+A 衝突の場合の核子数依存性にいたるまで系統的な研究をすることが出来る。最高ビームエネルギーは、金原子核で核子対当たり 100 GeV、陽子では 250 GeV である。設計ルミノシティは、Au + Au の場合は約 2

$\times 10^{26} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、p+p の場合は約 $1 \times 10^{31} \text{ cm}^2/\text{s}$ だが、将来的にはこの 10 倍程度までルミノシティを上げることが出来る。リング内のバンチ数は 60 (将来的には 120) で、バンチ交差時間間隔は 212 nsec (バンチ数 120 の場合は 106 nsec) である。RHIC では偏極陽子ビームの加速・衝突も可能で、直接光子生成やW粒子生成などのスピン依存性の研究も出来る。この偏極陽子の加速は、理化学研究所の RHIC SPIN プロジェクトによって可能になった。

表 1 RHIC 加速器の主要パラメータ (RHIC Design Manual より)

周長	3 8 3 3 m
ビームエネルギー Au 陽子	核子当り 100 GeV (19.7 TeV) 250 GeV
ルミノシティ Au+Au p+p	$2 \times 10^{26} \text{ cm}^2/\text{s} (\text{s}^{1/2} = 200 \text{ A GeV})$ $1 \times 10^{31} \text{ cm}^2/\text{s} (\text{s}^{1/2} = 500 \text{ GeV})$
バンチ数	60 (120 に増加可能)
バンチ内 Au ion 数	10^9
ビーム寿命	10 時間
衝突点数	6
ダイヤモンド長	18 cm r.m.s.
衝突点 β	10 m
アーク部曲率半径	242.78 m
Dipole 磁石数	396 (192/ring + 12 common)
Dipole 磁場	3.458 T
有効 Dipole 長	9.45 m
Quadrupole 磁石数	492
Quadrupole 磁場勾配	$\sim 71 \text{ T/m}$
運転温度	< 4.6 K
クールダウン時間	約 7 日

図 3 に RHIC 加速器コンプレックスでの Au ビーム加速の手順を示す。Au ビームは、まず BNL のタンデム加速器で核子当り約 1 MeV、荷電状態は $Q = +12$ に加速される。タンデムを出たビームは、550 メートルのビームラインを通り、Booster 加速器に入射され、そこで核子当り 95 MeV まで加速される。Booster の出口で $Q = +77$ になったビームは AGS に入り、そこで核子当り 10.8 GeV にまで加速される。AGS の出口で最後の電子 2 個を剥ぎとり、 $Q = +79$ で RHIC に入射される。

表 1 に RHIC の主なパラメータをまとめる。RHIC 加速器の詳細は、Web 上の RHIC Home Page, RHIC Design Manual でみることが出来る。(以下の URL 参照)
<http://www.rhichome.bnl.gov>
<http://www.rhichome.bnl.gov/NT-share/rhicdm>

4. RHIC での物理

RHIC での原子核衝突反応の描像

それでは、RHIC での原子核衝突反応では、どのような現象が起こるのだろうか。重心系で観測すると、ローレンツ収縮の結果半径約 6 fm、厚み 0.1 fm 程度の薄いディスク状になった金原子核がほぼ光速で衝突する。衝突原子核内の核子はビーム方向にほぼ直進しているため、2 枚のディスクが重なった部分だけが反応に関与して、他の部分はビームフラグメントとなって飛び去る。衝突係数が小さく、衝突原子核のほとんどの部分が反応に関与する場合を中心衝突とよび、逆に衝突係数が大きく、重なりが小さい場合を周辺衝突と呼ぶ。重なりが大きく、反応に関与する核子 (participant) が多いほど、より広い空間により高いエネルギー密度の状態を作ることが出来る。反応関与核子数は、個々の原子核衝突イベントを特徴づけるもっとも基本的な量である。

衝突の結果、2 枚のディスクは互いにすり抜け、その間に高温高エネルギー密度の状態を生み出す。反応のごく初期段階、2 枚のディスクがちょうど重なり合ったばかりの状態 ($t < 0.1 \text{ fm}/c$) に存在するものは高密度の quark と gluon の集団で、これらの間に摂動的 QCD によって記述出来る hard scattering が起こると考えられる。反応に関与する quark, gluon の数を核子のパートン分布関数からナイーブに見積ると、Au+Au 中心衝突の場合、単位ラビディティ当り百数十個の $p_t > 2 \text{ GeV}/c$ の散乱 quark や gluon が mini-jet として生み出されることになる。もちろん、こうした推定には大きな不確定性があるが、RHIC の原子核衝突の初期に実現されるこの高密度状態は、既存の e^+e^- collider や hadron collider では実現出来なかった状態である。

もし、高密度状態の持続時間が十分に長ければ、quark と gluon が散乱を繰り返すうち熱平衡状態が実現し、quark と gluon からなる熱平衡状態にある高密度ガス、すなわち QGP が作られる。RHIC の原子核衝突では、系のエネルギー密度はその膨張に伴って急激に下がるため、RHIC で QGP が確実に実現するという保証はない。また厳密な意味での熱平衡状態は、反応ゾーンの大きさが直径 10 数 fm と有限であるために実現しないであろう。一方、この反応ゾーンの大きさは、強い相互作用のスケール (約 1 fm) に比べて十分大きいので、平衡に達するための必要条件は満たしている。RHIC の Au+Au 中心衝突では、quark gluon の熱平衡状態に十分近い状態が実現するはずだと考えられている。

Bjorken によれば、RHIC のような高エネルギー原子核衝突の場合、反応初期のエネルギー密度 ϵ は重心系ラビディティでの全横エネルギー密度 dE_T/dy や粒子密度 dN/dy から以下の式で推定出来る [3]。

$$e = \langle M_t \rangle dN/dy / (2 t_0 A) = (dE_T/dy) / (2 t_0 A)$$

ここで $M_{\perp} = (M^2 + p_{\perp}^2)^{1/2}$ は粒子の横質量、 A は反応領域の断面積、 τ_0 は系が熱的平衡状態に達するのに要する固有時間である。 τ_0 は通常 $1 \text{ fm}/c$ 程度と推定されているが、 $0.5 \text{ fm}/c$ から $2 \text{ fm}/c$ 程度の不定性がある。

熱平衡に達するかどうかに関わらず、系の膨張に伴ってエネルギー密度は下がる。もし QGP が生成されるとすれば、系は QGP 相から QGP とハドロン相が並存する mixed phase の時期を経て、高密度のハドロンガスに変わる。最終的に、密度が十分低くなるとハドロン間の相互作用も終了して、生成したハドロンが飛び去って行く。

QGP 生成の証拠

RHIC での原子核衝突反応の時間発展はこのように複雑である。QGP への相転移が起こったかどうかを調べるためには、この時間発展の各段階から発生するシグナルから反応の時間発展を再構成して反応の全体像を理解しなければならない。

QGP 発生の際の証拠としては、いろいろなものが提案されているが、理論の不確定性のために、ただ一つだけで決定的といえるものは存在しない。この分野が、今のところ実験データ主導の、探索的な段階にあるためである。それだけに、測定の結果、通常ハドロン反応ではまったく説明のつかない特異な、面白い現象を発見出来る可能性もある。しかしそうした striking な現象がない場合は、多くの観測を総合することで、QGP の存在を実証することになる。

これは、CERN が今年 2 月に SPS での重イオンビーム実験を総括したときの方法でもある。CERN の発表では、SPS の Pb ビームを用いた 7 つの実験のデータを総合し、「個々の実験はどれも単独では全体像をつかめなかったが、すべての実験データを総合すると、物質の新しい形態、quark 物質が生成していたと解釈出来る」としたのである。RHIC の実験でも、同様のアプローチがとられる。図 4 は PHENIX 実験での QGP 探索の方針を模式的に示したものである。QGP の証拠として提案されている J/ψ の抑制、 ρ 中間子や ω 中間子などのベクトル中間子の性質変化、高温状態からの熱的輻射量などエネルギー密度の関数としてなるべく多数を同時に測定する。もし、ある臨界エネルギー密度でこれらの量の急激な変化が観測されれば、それは QGP への相転移が起こったと解釈出来るというものである。

それでは、QGP の証拠として提案されている測定量について、いくつか代表的なものについて解説したい[4]。まず、CERN の「新物質発見」の発表に QGP の間接証拠として挙げられたいくつかのシグナルとその解釈について解説する。次に、RHIC のエネルギー領域で新たに探索出来ると考えられている QGP シグナルをいくつか紹介する。

全横エネルギー密度 初期エネルギー密度の推定

測定量のうち、最も基本的なものは、全発生粒子数密度 dN/dV や全横エネルギー密度 $dE_T/d\mathbf{h}$ である。これらの量自

身は、QGP の直接的証拠ではないが、全横エネルギー密度から初期エネルギー密度が推定出来るので、それが十分に高く QGP への相転移に必要なとされる $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ 以上に達しているかどうかをみる事が出来る。また、これらは反応に関する核子数の単調増加関数になるので、これらの測定量から各イベントごとの反応関と核子数や初期の反応ゾーンの大きさを推定出来る。

SPS での Pb+Pb 中心衝突では、中心ラピディティ付近で $dE_T/d\mathbf{h} = 400 \text{ GeV}$ が測定されている [5]。これを先の Bjorken 公式に $\tau_0 = 1 \text{ fm}/c$ として当てはめると、初期エネルギー密度は約 $3 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ となり、QGP 相転移への臨界エネルギー密度 $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ を超える。ただし、SPS のエネルギーでは中心ラピディティでのバリオン密度が高いため、厳密には Bjorken 公式を適用できない。RHIC の Au+Au 衝突で到達される全横エネルギー密度は $dE_T/d\mathbf{h} = 1 \text{ TeV}$ 程度と予想され、そこでの初期エネルギー密度は約 $8 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ となる。RHIC エネルギー領域では、反応初期に高密度の gluon ガスが生じて、その間の熱的平衡が急速に進む結果、初期時間 τ_0 が $0.5 \text{ fm}/c$ 以下に短くなるという理論予想もあり、その場合の初期エネルギー密度はさらに高くなる。

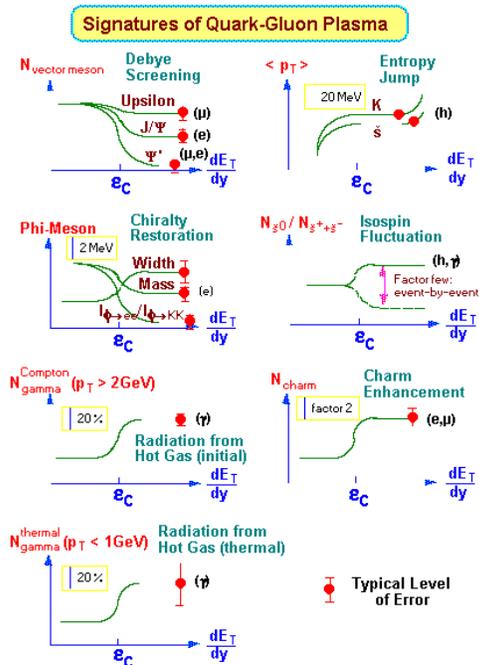


図 4 QGP シグナルとエネルギー密度

RHIC での $dE_T/d\mathbf{h}$ の測定に興味があるのは、全横エネルギー密度の最大値のほか、その反応関と核子数依存性である。SPS では、 $dE_T/d\mathbf{h}$ は反応関と核子数にほぼ比例することが示されている。RHIC では、反応初期に多数の mini-jet が生じ、それが全横エネルギー生成の半分程度に寄与すると予想されている。もしこの予想が正しければ、mini-jet

の生成量は反応関与核子数ではなく核子間衝突数に比例するはずなので、 $dE_T/d\mathbf{m}$ は反応関与核子数より急速に増加するはずである。これが観測されれば反応初期に多数の quark-gluon 散乱が起こっていることへの間接的証拠となり、また全横エネルギー生成のうちどれだけがそうした初期散乱によって生じているかを推定することが出来る。

ハドロンの測定 - 終状態での熱平衡の実現と膨張運動

反応の最終状態の様子は、ハドロンの測定から得られる。測定されるのは π 、K、pの運動量分布、生成量、同種2粒子干渉(HBT効果)による終状態での反応領域の広がり、測定などである。

終状態ハドロンの測定は、SPSでもAGSでも精密に行われていて、この結果原子核衝突反応でのハドロンの終状態については、以下に説明する系の膨張をともなう熱平衡モデルでよく説明が出来ることが分かってきている。

系が完全な熱平衡状態のハドロガスだとしよう。この場合、粒子の運動量分布はボルツマン分布となり、粒子の横質量分布は横質量 M_T の指数関数になる。

$$\frac{dN}{M_T dM_T} \propto \exp\left(-\frac{M_T}{T}\right)$$

ここで、指数関数分布の傾きの逆数 T が系の「温度」をあらわすことになる。また、ハドロンの生成比 r_i もこのボルツマン分布の積分から決まり、

$$r_i \propto g_i \int \frac{p^2 dp}{\exp(E - \mathbf{m})/T}$$

で与えられる。ここで、 g_i はスピン自由度、 \mathbf{m} は化学ポテンシャルである。しかし、原子核衝突はダイナミックな現象なので、このような静的な熱平衡状態は実現しない。系の膨張にともなう温度・密度が下がるため、まず粒子生成比が化学的凍結温度 T_{ch} で凍結し、さらに温度・密度の下がった熱的凍結温度 T_{th} でハドロ間相互作用が終了し、運動量分布が凍結すると考えられる。この間、ハドロ間の散乱が繰り返される結果、外側方向への集団的膨張運動が生み出されるので、観測される運動量分布は上記の指数関数分布に集団膨張速度が重なったものになる。

このような描像は、SPSとAGSでのハドロンの運動量分布をよく説明する。どちらのエネルギー領域でも、ハドロンの運動量分布は M_T の指数関数となるが、温度パラメータ T が生成粒子の質量に依存し、質量の重い粒子ほど温度パラメータが大きくなる。上に述べたように膨張運動をする熱源から粒子が放射されるとすると、粒子の熱的運動に膨張運動が加わる結果、質量 M の粒子の見かけの「温度」は $T \sim T_{th} + M\beta$ のように振舞うので、実験結果を説明する。さらに、集団的膨張モデルは2粒子干渉で得られる系の見かけのサイズが2粒子ペアの横運動量に依存することを予

言する。この現象もSPS、AGSで観測されている。2粒子相関のデータと粒子スペクトルデータとを組み合わせると、モデルの範囲内ではあるが、局所熱平衡温度と膨張速度を精度よく決定出来る。その結果、AGSのAu+Au衝突では「温度」 T_{th} が80-100MeV、表面膨張速度が約0.7c、SPSのPb+Pb衝突では T_{th} が100-120 MeV、表面膨張速度が約0.5cとなる。反応終結状態での系のサイズは2粒子相関から決定でき、AGSのAu+Au中心衝突の場合で自乗平均半径約8fm、SPSのPb+Pb中心衝突の場合で約11fmとなる。ちなみに、Au、Pb原子核の自乗平均半径はともに約5.3fmである。

ハドロンの測定 - 化学平衡の実現とストレンジネスの増加

粒子の生成量についても、AGSおよびSPSの実験結果は熱平衡モデルである程度説明が出来る。測定された粒子の生成比からモデルのパラメータ(化学凍結温度 T_{ch} とバリオン化学ポテンシャル \mathbf{m})を決めると、SPSでは $T_{ch} \sim 170$ MeV、 $\mathbf{m} \sim 270$ MeV、AGSでは $T_{ch} \sim 130$ MeV、 $\mathbf{m} \sim 500$ MeVになる。「温度」 T_{ch} が T_{th} より高いのは、まず化学的凍結が起こり、その後温度が下がって熱的凍結が起こるといった先の描像と一致する。また、ハドロンカスケードモデルの計算は、SPSエネルギー領域においては、系が急激に膨張・冷却するために、粒子構成比はハドロ間の相互作用によってはあまり変化しないことを示しており、これも終状態の粒子生成比が反応初期の記憶を留めていると考える根拠となる。

こうした熱平衡モデルとの比較で、特に興味深いのは、ストレンジネスを含むハドロンの生成である。よく知られているように、ハドロン反応でのストレンジネス生成はu、d quarkに比して抑制されている。高エネルギーのp+p、e⁺e⁻での粒子生成比を、熱平衡モデルと比較すると、 $T \sim 170$ MeVが得られるが、ストレンジネスを含む粒子については抑制ファクター約0.5を掛けねばならない。これに対して、SPSの原子核衝突反応の場合は、ストレンジネス抑制ファクター無しで実験データをほぼ再現出来る。すなわち、原子核衝突反応では、p+pに比べて、ストレンジネス生成が約2倍増加している。この増加ファクターはストレンジネスを多く含むハドロンほど顕著で、SPSのWA97実験は Ω の増加比約4、 Ξ の増加比約15を報告している[6]。

SPSのPbビーム実験を総括する特別セミナーでは、このハドロン粒子生成比をSPSで「quark物質」が作られたことの間接証拠の一つに挙げている。それは、化学凍結温度 $T_{ch} \sim 170$ MeVが予想されるQGP相転移の臨界温度に近いことから、系が化学凍結以前にはそれより高温の状態にあったと推定されるからである。また、ストレンジ粒子の増加を説明するには、化学凍結以前に急速にストレンジネスを生成するメカニズムが必要である。もし、QGPが生成されたと仮定すれば、カイラル対称性の回復に伴いs quark

の実効質量が下がり、かつ、高密度 gluon ガス中の $gg \rightarrow ss$ 反応によって急速にストレンジネスが生成されると予想される。そこで、SPS の実験結果は、 $T > 170$ MeV の「quark 物質」が生成され、そこでストレンジネスが飽和し、系がハドロン相に移る際に粒子比が統計的熱平衡に従って決定されると解釈出来るとしている。

RHIC でのハドロン終状態が、こうした描像と合致するかどうかは興味のあるところである。もしそうであれば、RHIC でのハドロンの運動量分布は SPS と同様 $T_{th} \sim 120$ MeV、表面膨張速度約 $0.5c$ で記述でき、粒子生成比は $T_{ch} = 170 - 180$ MeV、 $\mu_B \sim 0$ で記述でき、ストレンジネス生成は $p + p$ に比べて約 2 倍の増加が見られるはずである。終状態の系のサイズは半径約 $15 - 20$ fm、反応終結までの時間は $20 - 30$ fm/c かと予想される。PHENIX 実験でもハドロンの測定、特にストレンジ粒子の測定は、最初の重要な測定課題の一つである。

ベクトル中間子の性質変化 カイラル対称性の回復

ハドロンの測定は、反応の終結した状態を見ていることになるので、初期状態の記憶がストレンジネス生成量などに残っていると看做しても、その測定は間接的である。反応初期状態を見るには、光子や電子対といった、終状態相互作用のない「貫通性プローブ」を用いねばならない。

ベクトル中間子 (ρ, ω, ϕ) のレプトン対崩壊をみると、高密度ハドロンガス内でのこれらの粒子の様子を直接観測出来ると考えられる。高温または高密度物質内では、カイラル対称性回復の前兆現象として quark の実効質量が通常真空の場合に比して軽くなり、その結果ハドロンの質量や崩壊幅が真空中の値から変化すると予想されている。もしそうしたハドロンの性質変化が観測できれば、それ自体興味深いものであり、またカイラル対称性回復の前兆現象の直接的証拠となる。

SPS では、NA45 実験が $S+Au$ 衝突と $Pb+Au$ 衝突からの質量 1 GeV 以下の電子対を測定し、 $M=200 - 600$ MeV の低質量の電子対生成量が、終状態のハドロン分布から予想される量に比べて約 5 倍から 3 倍増加していることを報告している [7]。この低質量電子対の生成量は発生荷電粒子数のほぼ自乗で増加しているため、高密度ハドロンガス内での $p+p \rightarrow e^+e^-$ 反応で生ずる熱的な電子対を観測していると解釈出来る。しかし、ハドロンガス中での ρ 中間子の性質が真空と変わらないとした場合のモデル計算では、 ρ の質量付近で電子対が増加し、質量 $200 - 600$ MeV の領域ではそれほど増加しないので、実験データを再現することが困難である。したがって、NA45 の結果は ρ の質量または幅が変化しているのを見ている可能性がある。

この領域の測定では ρ, ω, ϕ の分離が大切である。それはこれらベクトル中間子の性質がカイラル対称性の部分回復に伴って変化する様子が異なると予想されているため

である。特に、 ρ 中間子については、もし長時間持続する QGP とハドロン相の mixed phase が生み出され、かつ ρ の質量がそこで通常真空での値から変化した場合、その変化した ρ をレプトン対の有効質量分布に第 2 の ρ ピークとして観測出来る可能性がある。また、 ρ/ω の比から、ハドロンガスの持続時間を計れる可能性もある。

SPS の重イオン実験では、低い p_t 領域では電子対で、高い p_t 領域ではミューオン対でこれらベクトル中間子を観測しているが、質量分解能が不十分のために、現在のところ ρ/ω を分離できていない。(NA45 実験は高質量分解能に測定器をアップグレードしたが、その結果はまだ報告されていない。) PHENIX 実験では、高質量分解能の電子対測定アームにより、これら 3 中間子をすべて分離して測定する予定である。

J/ψ 抑制 QGP 内のデバイ遮蔽

現在、QGP の最も有力な証拠と考えられているのは松井哲男氏と H. Satz が予言した J/ψ などのチャーモニウムの抑制である [8]。 J/ψ は質量が大きいため反応初期にのみ生成される。かつ、一旦作られると、その結合エネルギーが大きいので、ハドロンとの相互作用では容易に分解しない。一方、QGP への相転移が起こった場合、QGP 内ではデバイ遮蔽効果が働くために、 J/ψ が形成できなくなると考えられる。このため、QGP の存在は J/ψ の生成量の抑制として観測されるはずである、と彼らは予言した。

J/ψ の生成が $p + p$ 、 $p + A$ から予想される量に比べて $Pb+Pb$ 衝突では抑制されていることが、SPS の NA38/NA50 実験グループによって観測されている [9]。彼らは、 $p+p$ 、 $p+A$ 、 $O+A$ 、 $S+A$ での J/ψ 生成の系統的な測定を行い、 $S+U$ の中心衝突までのすべてのデータは、 J/ψ が核子と約 7 mb の吸収断面積を持つとして説明出来ることを示した。しかし、 $Pb+Pb$ の中心衝突では、この系統的な減衰・吸収からさらに大きな抑制を受けていることを観測した。彼らのデータ解析によると、 $Pb+Pb$ 衝突での J/ψ 抑制は推定エネルギー密度が約 2 GeV/fm³ までは $p+p$ から $S+U$ にいたる系統的な減衰と一致する。しかし、それより高いエネルギー密度では急激に約 30% 大きな抑制が起り、その後しばらくこの 30% 強い抑制度が続く。さらにエネルギー密度が上がると、推定エネルギー密度が約 3 GeV/fm³ に達すると第 2 段階のより大きな抑制が開始される。

NA50 が観測した J/ψ 抑制が QGP 効果によるものであるかどうかは現在盛んに議論されている。実験データに見られる 2 段階の抑制パターンを通常のハドロン間相互作用で再現することは困難である。一方、抑制が QGP によるものだとすれば、2 段階の抑制パターンは以下のように説明出来る。 $p+p$ 、 $p+A$ 反応で生成される J/ψ の約 30% は $c\bar{c}$ J/ψ によって生じていることが知られている。また、 $c\bar{c}$ は J/ψ に比べて結合エネルギーが小さいので、QGP 相内で

は J/ψ より低いエネルギー密度で抑制されると予想される。したがって、QGP 相転移が起こると、まず低いエネルギー密度で c を起源とする J/ψ (全体の約 30%) が抑制され、エネルギー密度がさらに増加すると直接生成されている J/ψ 自身が抑制されると予想出来る。このパターンは実験データとよく一致している。

SPS での J/ψ 抑制が、QGP 効果であるとするれば、SPS の 2-3 倍高いエネルギー密度が実現出来る RHIC の Au+Au 衝突では、極めて衝突係数が大きい周辺衝突を除き、 J/ψ はほとんど生成しないと予想される。また、 J/ψ よりも結合エネルギーが大きい Upsilon 粒子も、RHIC の最高エネルギーでは抑制されると予想される。 J/ψ や Upsilon の測定は RHIC 特に PHENIX 実験での最重要実験課題の一つである。

以上は、CERN の SPS でも観測されている QGP のシグナル (の候補) だが、以下に RHIC のエネルギーで可能になるいくつかのシグナルの候補について述べる。

チャーム生成 反応初期の gluon 密度の測定

RHIC では、反応初期の gluon-gluon 衝突の結果、大量の charm 粒子が生成されると予想される。RHIC energy での p+p 反応での charm 生成断面積は $200 \mu\text{b}$ から $600 \mu\text{b}$ と推定される。A+A での charm 生成が $s_{AA} \sim A^2$ のように点状の振る舞いをすれば、Au+Au 中心衝突では 1 イベント当たり 6 個から 20 個の charm 対が生成されることになる。

この charm 粒子を測定できれば、反応初期状態の gluon 密度の測定になる。もし、点状の振る舞いからのずれが見え、charm 生成量が予想よりも減少した場合は gluon shadowing の効果を、また逆に charm 生成量が増加していれば高密度の gluon 間の 2 次的、3 次的散乱効果を見ていることになる。初期温度が極めて高くなれば ($T > 500 \text{ MeV}$) 熱的な charm 生成効果も観測出来る可能性がある。P_t 分布の測定から、c quark が高温物質内を通過する間のエネルギー損失効果を見ることも出来る。

観測方法としては、直接測定は PHENIX では困難であるが、charm のレプトン崩壊からの単電子や単ミュオンの測定、charm 対の電子対、ミュオン 対、電子・ミュオン対への崩壊の測定から charm 生成を間接的に測定出来ると考えている。

高横運動量ハドロン QGP 内のエネルギー損失

高エネルギーの quark や gluon が高温物質内を通過するとき、gluon 制動放射にともなう輻射エネルギー損失により、大きくそのエネルギーを失うという QCD の理論予想がある [10]。それによると輻射エネルギー損失は通過距離の自乗に比例する。もしこの予想が正しければ、反応初期の $q+q$, $q+g$, $g+g$ 散乱で生じた高横運動量の quark や gluon は QGP 相内を通過する間に大きくそのエネルギーを失い、その結果、高エネルギー jet の生成が抑制されることになる。

実験的には、RHIC の Au+Au 衝突で jet を直接的に再構成・観測することは極めて困難である。それは、観測したい jet と無関係に発生する粒子が多く、これが jet cone 内にバックグラウンドとして入って来るからである。jet の直接観測は困難だが、その leading particle を観測することは可能である。そこで、高横運動量のハドロン生成断面積を測定し、それを p+p の場合と比較することでエネルギー損失効果があるかどうかを探る。もし、エネルギー損失効果がなければ A+A での高横運動量粒子の生成断面積は p+p の A^2 倍になるはずである。もしこれより低い断面積ならば、エネルギー損失または他の原因で、高横運動量粒子の生成が抑制されていることになる。

熱的電磁放射 QGP からの直接シグナル

QGP の証拠としてもっとも直接的なものは、QGP 内部での $q+q \rightarrow l+l$ や $q+g \rightarrow q+g$ という過程で生成されるレプトン対や直接光子である。QGP からの熱的レプトン対の生成量は、質量 $1 \sim 3 \text{ GeV}$ の領域で、ハドロンガス中で生ずるレプトン対や Drell-Yan 過程で生ずるレプトン対に比べて多くなると予想されている。これが観測されれば、QGP 内部の温度・エネルギー密度などを質量スペクトルから測定することが出来る。同様に、QGP からの熱的直接光子も横運動量 $1 \sim 3 \text{ GeV}$ の領域で、反応初期の QCD Compton 散乱で生じる直接光子生成に対して優勢になると予想されている。

2 月の CERN の発表の時点では、SPS の Pb ビーム実験では直接光子の観測は報告されていなかったが、最近、SPS の WA98 実験が Pb+Pb 中心衝突で $p_{T} > 1.5 \text{ GeV}/c$ の領域に直接光子を観測したと発表した [11]。これが確認され、かつこの直接光子が QGP 起源のものであるとするれば、RHIC ではさらに大きな直接光子のシグナルが得られる可能性が高い。同様に、レプトン対チャンネルでも、RHIC では QGP からのより大きなシグナルが期待出来る。

5. PHENIX 実験

PHENIX は RHIC での 2 大主要実験の一つで、12ヶ国、40 数研究機関から約 400 名が参加する国際共同実験である。(http://www.phenix.bnl.gov) 日本からは、日米科学技術協力事業(高エネルギー物理学)に基づいて、KEK・東大原子核科学研究センター (CNS)・東大・筑波大・広島大・早稲田大・長崎総合科学大が参加し、また PHENIX での偏極陽子実験のために理化学研究所・京大・東工大が参加している。PHENIX の目的は、RHIC での原子核衝突反応からの QGP の証拠を可能な限り多数同時に測定し、それにより QGP の生成を実証し、その性質を研究することにある。

QGP 生成の証拠としては、先に述べたように「ストレンジネスの増加」「 J/ψ 粒子の抑制」「ベクトル中間子の性質変化」「高横運動量粒子生成の抑制」などが候補に挙げられ

ている。これらの測定のためには、横運動量で数 GeV/c までのハドロン粒子の識別および、電子・ミューオン・光子の測定が重要になる。また、高エネルギー粒子の精度良い測定やベクトル中間子の性質変化の測定のため、高い運動量分解能が要求される。このため、PHENIX では

1. 高度な粒子識別能力
2. 電子、光子、ハドロン、ミューオンの測定能力
3. 荷電粒子の高運動量分解能での測定。
4. 測定装置の非常に高いセグメンテーション
5. 高いイベントレートでの、希少断面積の現象（高横運動量粒子、レプトン対など）の測定

などを重点において設計・建設されている。4は Au + Au 中心衝突での発生粒子数は単位ラピディティ当り荷電粒子数 1,000 個程度に達すると予想されるため、この高い粒子密度で一つの読み出しチャンネル内に複数の粒子が入るのを防ぐためである。有力な QGP シグナルは、 J/ψ やレプトン対など極めて生成量が少ないので、高い反応レートでの測定が必要となる。限られた建設予算内でこれらの要求を満足し、かつ 4π 近い大立体角を保つことは不可能であったので、測定器の立体角は最近の粒子検出装置としては小さめなものになっている。

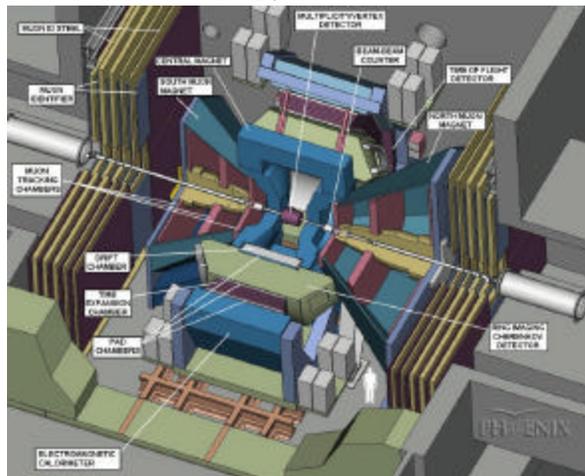


図 5 PHENIX 測定器

ところで、RHICのもう一つの主要実験装置である STAR 実験は PHENIX と対照的なデザインを採用し、ほぼ 4π を覆う巨大な TPC を建設した。しかし STAR 実験は PHENIX のように多数の粒子識別装置を持たない。STAR 実験は、そこで、その大立体角を生かして事象ごとに数千の荷電粒子を測定して、QGP 生成に伴う異常なゆらぎを探すなど、事象ごとの解析に重点を置いている。他の 2 実験についてその特色を述べると、PHOBOS は Si 検出器からなる測定器で、低運動量の荷電粒子の測定や広い擬ラピディティ範囲にわたる $dN/d\eta$ とそのゆらぎの測定などを高イ

イベントレートで行うことに重点を置いている。BRAHMS は、小立体角ではあるが回転可能な磁気スペクトロメータを 2 台用いて、広いラピディティ範囲にわたって荷電ハドロンの運動量分布を測定出来るのが特色である。

図 5 に PHENIX 測定器の全体図を示す。衝突点の周りに、磁極半径約 2 メートルの中央電磁石が置かれ、ビーム軸を対称軸とする軸性磁場を生み出す。この中央電磁石を取り囲むように、その左右に東アーム、西アームと呼ぶ 1 対の中央測定器アームが置かれ、重心系で 90 度付近に放出されるハドロン、光子、電子(対)を測定する。ビーム軸前後方にはそれぞれ南ミューオンアーム、北ミューオンアームと呼ぶミューオン測定器が置かれている。

PHENIX は全部で約 10 の測定器サブシステムからなっているが、以下ビーム軸に近い部分から各測定器システムについてその概要を説明する。

MVD (発生粒子数・バーテックス測定器)

衝突点の近傍には MVD (Multiplicity Vertex Detector) と呼ぶ Si 検出器が置かれていて、 $-4 < \eta < 4$ の範囲を $DF=2p$ 覆う。この測定器の目的は、(1)衝突で発生した荷電粒子数を測定し、反応の中心度を決定し、(2) 反応の起こった vertex position を測定することにある。QGP の生成に伴って発生粒子の $dN/d\eta$ 分布に大きなゆらぎが現れた場合、この装置で検出することが出来る。

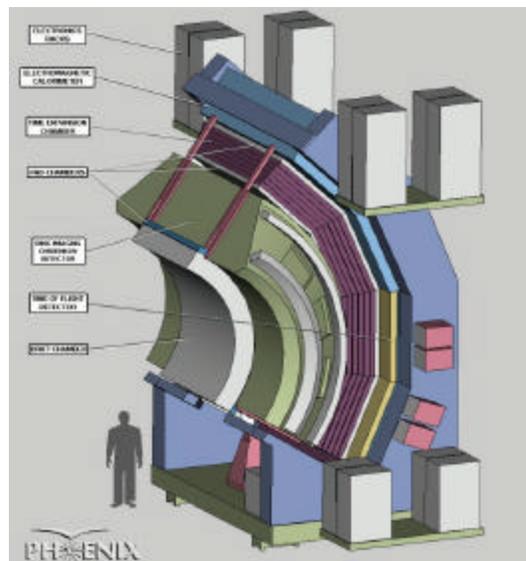


図 6 PHENIX East Arm

BBC (ビームビームカウンター)

ビーム軸の周り、前後方には BBC (ビーム・ビームカウンター) が置かれている。これは、それぞれ 64 本の quartz をラディエータに用いたチェレンコフカウンターで、 $3 < \eta < 4$, $DF=2p$ を覆っている。この装置は、(1)ビーム・ビーム衝突を検出し minimum bias trigger を生み出し、(2)反応

開始時間を測定し、飛行時間測定による粒子識別のためのスタート時間を決め、(3)前後の BBC へのシグナルの時間差から衝突点の位置を決定する役割を持っている。電磁石の漏れ磁場が強い(約 3 kG)場所に置かれるため、メッシュドダイノードの光電子増倍管を用いている。反応開始時間と衝突点位置を精度よく決めるために、個々のカウンターは高い時間分解能($\Delta t = 40$ ps)を持っている。

図 6 に中央測定器の 2 アームのうち、東アームの構成を示す。西アームはこれとまったく同一ではないが、ほぼ同じ構成である。東西の各アームは、 $-0.35 < h < 0.35$ 、 $Df = 90^\circ$ 、立体角で約 1 str を覆い、中心ラビディティに発生する電子、光子、ハドロンを高精度で測定し、両アーム用いて電子対を高質量分解能で測定する。電子対の質量分解能は $M = 1$ GeV で約 0.4%、 J/ψ で約 0.6% である。この高い運動量分解能は、 J/ψ 測定の S/B 比を高く保ち、またベクトル中間子(ρ, ω, f_0)の性質変化を探るために必要である。

DC (ドリフトチェンバー)

各アームの最内側、ビームラインから 2.02m から 2.46m にかけて、ドリフトチェンバー (DC) が置かれている。DC の内径が 2.02 m と大きいのは、これより内側では飛跡密度が高くなり過ぎて飛跡再構成が困難なためである。セグメンテーションを増やすため、フィールドワイヤの配置に工夫して、各センスワイヤは左右のうち片側のドリフトセルだけを検知するようになっている。さらに、各センスワイヤは $Z = 0$ で分割されていて、 $Z < 0$ と $Z > 0$ が独立に読み出される。読み出し総数は 12800 チャンネル。位置分解能は $150 \mu\text{m}$ /ワイヤ、2 パルス分解能は約 2 mm、運動量分解能は $1 \text{ GeV}/c$ の粒子に対して約 0.6% である。

PC (パッドチェンバー)

DC の直後にカソードパッド読み出しのワイヤーチェンバー (パッドチェンバー PC1) が置かれている。PC1 で粒子飛跡上の 3 次元点を測定して飛跡再構成上でのパターン認識を助けている。

RICH (リングイメージ・チェレンコフカウンター)

この 2 台のトラッキングチェンバーの次に、 $R = 2.55$ m から 4.1m にかけてリングイメージ・チェレンコフカウンター (RICH) が置かれている。これは PHENIX における電子識別の主力装置であり、PHENIX の中央測定器をもっとも特色づける装置といえる。

RICH は容積約 40 m^3 のガス容器内と、その中に置かれた超薄型球面反射鏡、およびその焦点面に敷き詰められた多数の光電子増倍管 (PMT) からなる。PMT は 16×80 のアレイ状に配置され、このアレイが RICH 1 台につき 2 面ある。RICH 全体での PMT の総数は 5120 本である。

PHENIX の RICH は本質的には電子識別用のスレッシュホールド型チェレンコフ測定器である。リングイメージングの光学を用いているが、チェレンコフリングの直径の測

定によって粒子識別をする訳ではない。運動量が数 $10 \text{ MeV}/c$ 以上の電子が RICH 中のガスラジエータ (CO_2 またはエタン) 内でチェレンコフ光を発生するのに対して、ほとんどのハドロンはチェレンコフ光を出さないことを利用して電子識別を行う。チェレンコフ光をリング状に結像させることで、光学的に高いセグメンテーションを持たせている。

RICH は中央電磁石の外のほぼ磁場がゼロの領域に置かれている。このため電子は RICH 内を直進して、そこから発生するチェレンコフ光は球面反射鏡で反射され、リングイメージを PMT アレイ上に結像する。チェレンコフリングの中心位置から、親の電子の進行方向ベクトルが分かるので、これと DC・PC などの飛跡測定器で測定された荷電粒子飛跡とをマッチさせて、そのうちどれが電子かを決定する。



図 7 PHENIX RICH 測定器の 1 号機。反射鏡の調整が終了した直後の様子。反射鏡に写っているのは 2560 本の光電子増倍管。

KEK で行った、小型のプロトタイプを用いたテストビームでは、RICH の電子・ハドロンの分離能力として、電子への効率 99% に対して、ハドロンが電子と誤認される確率が 0.01% 以下という極めて良好な結果が得られている。ただし、これは、テストビーム実験のように理想的な場合の性能であって、Au+Au の中心衝突での電子識別能力はこれよりは低くなる。それは、高い粒子密度では、電磁シャワーなどで生じるチェレンコフリングに、ハドロンの粒子飛跡がランダムに重なることで電子と誤認される可能性が増えるためである。GEANT を用いた Monte Carlo Simulation により、そうした効果を評価すると、Au+Au 中心衝突では、電子測定効率 80% でのハドロンの排除力は 200 から 1000 程度になると予想される。

TEC / PC

RICH の外側、 $R = 4.5 \text{ m}$ から 4.98 m にかけて、Time Expansion Chamber (TEC) とパッドチェンバー (PC) からなる外部トラッキングステーションがある。TEC はエネ

ルギーロス (dE/dx) の測定による粒子識別能力を兼ね備えたトラッキングチェンバーである。東アームは 6 面の TEC と 1 面の PC、西アームは 2 面の PC からなる。

EMCAL (電磁カロリメータ)

TEC/PC の外側には電磁カロリメータ (EMCAL) が置かれている。PHENIX の EMCAL は 2 種類あり、一つは鉛シンチレータのサンプリングカロリメータ、もう一つは鉛ガラスである。中央検出器の各アームのカロリメータ部分はそれぞれ $DF=22.5^\circ$ のセクター 4 個に分かれている。このうち、西アームの全 4 セクターと東アームの上側 2 セクターは鉛シンチレータ、East Arm の下側 2 セクターは鉛ガラスになっている。Au+Au 衝突で予想される高い粒子密度のもとで光子・電子のエネルギーを測定するために、PHENIX の EMCAL は非常に細かく細分化されている。鉛シンチレータの 1 セクターは縦 $36 \times$ 横 $72 =$ 合計 2,592 個の各 $5.5 \text{ cm} \times 5.5 \text{ cm}$ のタワーからなり、鉛ガラスの 1 セクターは縦 $48 \times$ 横 $96 =$ 合計 4,608 個の各 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ のタワーからなる。EMCAL 全体は 15,552 の鉛シンチレータと 9,216 の鉛ガラスカウンターからなる。この細かいセグメンテーションにより、Au+Au の中心衝突の場合でもヒットしているタワーの割合は 5% 程度と予想されている。これにより、Au+Au 中心衝突でも、 p^0 を $p_t > 1.5 \text{ GeV}/c$ で再構成・測定でき、したがってその領域での直接光子探索が出来る。また、近接した 2 光子を分離出来るので、p+p 反応のように発生粒子数が少ない場合は、横運動量 $25 \text{ GeV}/c$ から $30 \text{ GeV}/c$ までの単光子と p^0 を区別出来る。エネルギー分解能 $\Delta E/E$ (GeV) は、鉛シンチレータが $((7.8)^2/E+(1.5)^2)^{1/2} \%$ 、鉛ガラスが $((5.8)^2/E+(1.0)^2)^{1/2} \%$ である。鉛シンチレータは Δt で約 $200 \text{ ps}/E(\text{GeV})$ の時間分解能をもち、それによって $1 \text{ GeV}/c$ 程度までのハドロン粒子識別 (p, K, p^0 の分離) も可能である。

TOF (飛行時間測定器)



図 8 PHENIX TOF 測定器。筑波大の学生によりケーブル取り付けが行われたときの様子。

鉛ガラス EMCAL と TEC/PC の間には飛行時間測定器 (TOF) が置かれている。TOF は PHENIX でのハドロン粒子識別の主力測定器である。TOF はそれぞれ 96 本のシンチレーションカウンターからなるパネル 10 枚、全部で 960 本のカウンターからなる。このうち 8 パネルが下から 2 番目の鉛ガラスセクターの全面を覆い、残り 2 パネルが下側の鉛ガラスセクターの中央部に置かれて、全体で T 字型の領域を覆っている。各カウンターはその両端から PMT で読み出されるので、1,920 本の PMT がある。TOF は世界最高クラスの高時間分解能 ($\Delta t \approx$ 約 80 ps) を持ち、横運動量約 $2.5 \text{ GeV}/c$ までの π 中間子と K 中間子の分離、約 $5 \text{ GeV}/c$ までの陽子・反陽子の識別が出来る。TOF の 10 パネル中の 5 パネルは、SPS の重イオン実験 WA98 で使用され、その性能が実際の実験環境下で実証されている。

ミュオン測定器

ビームの前後方にはそれぞれ南北のミュオンアームが置かれる。各ミュオンアームはラッパ状のミュオン電磁石とその内側に置かれた 3 基のミュオントラッキングステーション、その後ろの 5 層からなるミュオン同定装置からなり、それぞれ $1.2 < \theta < 2.4$ 、 $DF \approx 2 \text{ ps}$ を覆っている。中央電磁石の磁極 (厚み約 60 cm) とその表面に取り付けられた 20 cm 厚の銅板が最初のハドロンアブソーバの役割をし、これを突き抜けた粒子だけがミュオンアームによって測定される。各ミュオンアームは、中央測定器の 2 アームに比べ、レプトン対に対するアクセプタンスが 6 倍程度あるので、 J/ψ や Upsilon を高統計で測定出来る。

PHENIX では、これらの測定器を用いて、ストレンジ粒子生成、ベクトル中間子、 J/ψ チャーム、高横運動量ハドロン、直接光子、レプトン対など、第 4 節で述べた QGP のシグナルのほとんどすべての測定が可能である。

PHENIX には日本から多くの研究機関が実験の提案・概念設計段階から参加し、測定器建設の上で非常に大きな役割を果たして来ている。日本グループの活動は PHENIX の結成以前から始まっている。1991 年に RHIC の実験プロポーザルが募集されたとき、レプトン対の測定を主眼とする提案が 3 件あり、競い合った。RHIC の PAC は 1992 年にこの 3 提案すべてを不可として、3 者が共同して新実験提案を作るようにと裁定した。こうして生まれたのが PHENIX である。この 3 提案の 1 つが日本グループの提案した RICH を用いた電子対測定実験提案であり、このアイデアが現在の PHENIX にも大きな影響を与えている。

PHENIX 測定器での日本グループの分担は、以下のようになっている。トリガーの要の BBC を広大、ハドロン粒子識別の主力装置の TOF を筑波大、電子識別の主力装置の RICH を KEK、東大、CNS、早大、長崎総科大、ドリフトチェンバー読み出し回路用の ASIC である TMC チップを KEK、中央電磁石のコイルを KEK が担当している。以上

は日米科学技術協力事業（高エネルギー物理学）と科研費特別推進（筑波大）により、日本側が全建設費を負担し、日本側のリーダーシップのもとに日米の協力で建設した。

PHENIX には、重イオン衝突による QGP 物理の他に、偏極陽子を用いた実験、SPIN プログラムがある。これは、RHIC で偏極陽子を加速、 $\sqrt{s} = 500\text{GeV}$ で衝突させ、直接光子生成や W 粒子生成の偏極度依存性を測定することで陽子内の gluon や反 quark の偏極度を測定しようというもので、理化学研究所のイニシアチブで可能になった実験プログラムである。この RHIC SPIN プログラムに基づき、理化学研究所が PHENIX の南ミュオンアームの全建設費を負担し、理研、京大、東工大がその建設に参加している。ミュオン同定装置の一部は、理研・京大・東工大が KEK の施設を利用して建設した。また、理研・京大は EMCAL 測定器にも参加している。

PHENIX の測定装置の現状を述べると、2000 年始めに中央測定器のほぼ全サブシステムが完成した。東西の 2 アームのうち西アームは 1998 年 11 月に、東アームは 2000 年 1 月に IR (衝突実験室) にロールインした。これら 2 アームと BBC、MVD が 2000 年度 RUN における PHENIX である。MVD は、RHIC のビームが安定するまでは Si 検出器がビームによるダメージを受ける可能性があるためまだインストールされていないが、7 月 4 日（独立記念日）の連休明けの短期シャットダウンでインストールされる。西アームの PC2 と PC3 だけは未完成だが、これは 2000 年度 RUN 終了後のシャットダウン期間内に取り付けられる予定である。また、建設予算の不足のため、2000 年度 RUN では各アームの EMCAL の半分と MVD の一部は読み出されない。この部分の読み出しは 2001 年度 RUN までに回復する。2 台のミュオン測定器は、南ミュオンアームを 2001 年度の RUN までに、北ミュオンアームを 2002 年度の RUN までに完成する予定で建設が続いている。

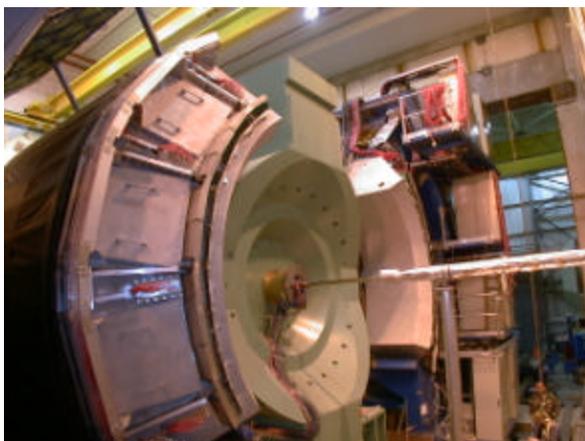


図 9 IR にロールインした PHENIX 中央測定器。中央電磁石を挟む東西の 2 アームと、磁石中央を貫くビームライン、それを取り囲む BBC 測定器が見える。

6. 「最初のイベント」

最後に今年初めから、PHENIX における最初のイベントの観測にいたるまでの経過を述べたい

PHENIX の東アームは、2000 年 1 月初めに組み立てが完了、IR へロールインする。東アーム自体に比べ、IR への入り口はぎりぎりの大きさで、しかも東アームのすぐ隣には建設途中の南ミュオンアームがあって道を塞いでいるので、真っ直ぐには IR に入れない。1 月 18 日から動き始めた東アームは、南ミュオンアームを 4 日かけて迂回し、1 月 21 日に IR 内にはいる。IR 内でさらに 2 回位置調整運動をして、1 月 26 日に IR 内の所定のポジションに着く。中央電磁石と東アームの間隙は 5 cm。設計通りフィットすることが確認される。

RHIC は 2 月初めから超電導磁石のクールダウンを開始する。PHENIX のほうも、東アームロールイン後、測定器の準備作業が RHIC との競争のようにして続く。加速器が運転を始めると、IR へのアクセスは不可能になってしまうので、それまでに何とか間に合わせねばならない。4 階建の足場がアームの周りに組み上げられる。読み出し回路のインストールとテスト、ガスシステムや電子ラックの設置・配線・配管、様々な監視用センサーの設置、安全装置の設置、中央電磁石の試験運転などまだ無数の作業が残されている。IR の外側では、入り口を塞ぐための巨大なシールドングドア（約 10m×10m）が組み立てられ、RHIC が準備完了になり次第閉じられる準備がされる。RHIC Management との合意で、PHENIX の IR はビームが回り始める直前までアクセスが許可されている。

3 月末に、RHIC のクールダウンが完了。3 月 23 日、PHENIX でもシールドングドアが閉じられる。このドアは RUN が終了するまで開かれることはない。今後は、一度に人が一人通れるだけの人間アクセスドアを通じてのみ IR 内に入れる。それも、RHIC へのビーム打ち込みのために 24 日には閉じられる。その時点ではいくつかの PHENIX のサブシステムはまだ準備が完了していなかった。壁の外側で、読み出し装置のテストなどをリモートコントロールでしながら、RHIC のビームが止まってアクセスする機会を待つ。

IR が閉じられ、両リングにビームが打ち込まれる。4 月半ば、リングの一部に不具合が発見され、両リングの約 1/6 が修理のため常温に戻される。PHENIX の IR でも人間アクセスドアが開かれ、やり残されていた測定器の準備作業が再開する。4 月末、RHIC の修理が完了し、再び IR が閉じられて加速器の運転が再開された。

4 月 30 日、中曽根文部大臣・科学技術庁長官が BNL を訪問された。その際、RHIC は運転中だったが、特別の措置として一旦ビームをとめて大臣に IR に入ってもらい、PHENIX を見学していただいた。

5月に入り、加速器の調整が続く。電源インターロックが頻繁に作動するため、なかなか加速出来ない。AGSからの入射エネルギー(核子当たり約 11 GeV)での足踏みが続く。

5月17日、青リングが transition energy (RHIC では $\gamma=22.9$) を突破する。超電導加速器として、transition energy を通過するのは RHIC が最初である。6月2日、黄リングでも transition energy を超える。

PHENIX ではガスシステムが完成し、安全検査もクリアして5月20日にトラッキングチェンバーへのガスが流れはじめる。このころ、測定器サブシステムごとにデータの収集も始まり、いくつかの測定器で宇宙線データが取られる。

6月初め、両リングに6バンチずつのビームが打ち込まれる。両リングとも、 $\gamma=60$ までの加速に成功する。

6月7日、PHENIX の EOG(実験装置運営グループ)のミーティングで、週末に取られたデータが示される。BBCを担当する大西宏明氏は BBC の南北時間差分布を示した。ビーム・ガス衝突を示す、二山のピークの間、ビーム・ビーム衝突が現れるべきところに数イベント記録されている。まだビーム衝突のためのステアリング調整がされていないので、ビーム・ビーム衝突などないはずなのだが、何かの偶然で衝突が起こったのか? Drift chamber も、多数のトラックを示す「興味深い」イベントを示した。このミーティングでは示されなかったが、その他、EMCAL、PCなどが、ビームと同期して、大きなアクティビティを示す「興味深いイベント」を記録している。

これら「興味深いイベント」の図は翌6月8日の RHIC と測定器グループのミーティングで示される。このミーティングで、こうした測定器が動いていることを示す図を持って来たのは PHENIX だけだった。

6月10日。RHIC は最初の衝突を $\gamma=30$ で行うため、衝突モードに入る。低いエネルギーでまず衝突を試みるのは、RHIC のランプアップ時間が長いから、低いエネルギーの方がより頻繁にフィル出来るためである。しかし、週末の間は、衝突が起こることはなかった。

6月10日午後、STAR が短期間のアクセスを行う。どうやら、このアクセスで彼らはエレクトロニクスを読み出し問題を解決したようである。

6月12日午後9時ころ、STAR で最初の金 金衝突が観測される。PHENIX でも懸命に衝突事象を捉える努力が続けられていたが、ビーム・ビーム衝突と見られるイベントはない。そもそもトリガーカウンターである ZDC と BBC のコインシデンスが増加しない。タイミングが狂っているのか? RHIC からの TV スクリーンには、STAR での衝突観測のニュースが流れ、暫くして PHOBOS でも衝突が見つかったとのニュースが流れる。午前1時頃、尾崎副所長が PHENIX のコントロールルームを不意に訪れ、「PHENIX で衝突が見えたか」と質問する。オンラインの

総責任者である John Haggerty が対応し、「個々の測定器には、ビーム衝突かと考えられるデータが記録されているが、それがビーム衝突であるとは確定できない。多くの測定器があるためそれを全て同時にビームに同期するのが難しい」と答える。その場にいた誰も「見えた」とは答えられない。何故見えないのか?

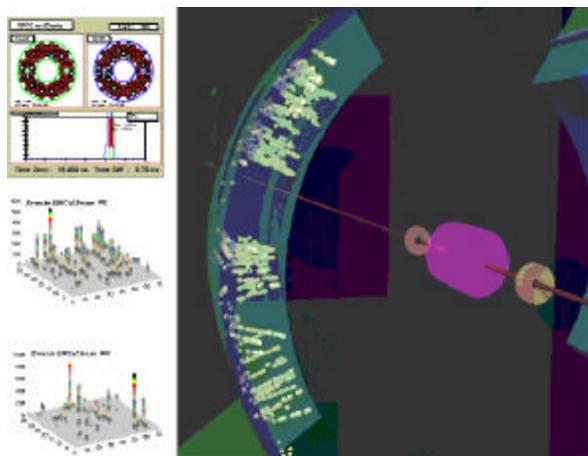
結局、この晩に PHENIX が衝突を観測出来なかったのは、PHENIX のせいではなく、PHENIX ではそもそも衝突が起こらなかったためである。ビームスポットサイズが STAR と PHOBOS のほうが約2倍大きく、ビームを当てやすいので、STAR と PHOBOS で先にビームがステアリングされたのだった。加速器のコミッショニング段階なので、初めは1度に1箇所ずつビーム衝突を試して行くしかない。ビームスポットの小さい PHENIX と BRAHMS でのビーム・ステアリング調整はその次に行われた。

6月13日、RHIC での「最初の衝突」の公式発表がなされる。STAR で記録された、無数のトラックを示す TPC の図が RHIC の Web に載る。

PHENIX では、13日、14日とビーム衝突探しが続くが、なかなかビームが安定しない。14日午後、一旦ビームが止まる。PHENIX でも数時間の IR へのアクセスがあり、RICH 読み出し回路の問題などが解決される。午後5時にアクセス終了。しばらくして、ビームが回復し、PHENIX でのビームステアリングが再開されるが、ビーム衝突は記録されない。午前3時頃ビームが落ち、しばらく回復しない。

6月15日早朝、午前5時半頃、RHIC にビームがフィルされる。トリガーカウンターのコインシデンスが増え、大きなイベントサイズのデータが記録され始める。午前6時30分頃、PHENIX での「最初のイベント」が記録され、ビーム・ビーム衝突と確認される。

図10は、その「最初のイベント」の図である。この図は、15日の昼までにまとめられ、翌16日出版の BNL の週間新聞 Brookhaven Bulletin に掲載された。左上に示されているのが BBC のヒットパターンで、南北64個のカウンターのほとんどすべてにヒットが記録されている。その下は、南北 BBC のヒットのタイミング分布で、すべてのチャンネルがほぼ同じタイミングでヒットしていることから、これは $Z=0$ 付近のビーム・ビーム衝突であることを示す。その下には、西アームの EMCAL の2セクターに記録されたエネルギーのレゴプロットである。右の大きな図は DC に記録された飛跡の再構成図で、VERTEX 方向から多数の荷電粒子が来ていることを示している。図の編集の都合でここには示されていないが、このとき稼動していた PHENIX の全サブシステム(他に ZDC, TOF, PC, TEC の4測定器)このイベントで多くのヒットが記録されている。



PHENIX evidence of RHIC collisions recorded Thursday morning, June 15 after accelerator operators brought beams into collision in the PHENIX interaction region. Signals were recorded simultaneously in seven PHENIX detector subsystems: Zero-Degree Calorimeters (ZDC), Beam-Beam Counters (BBC), Time-of-Flight Detectors, Pad-Chambers, Drift Chambers, Time Expansion Chambers, and Electromagnetic Calorimeters (EMCal). The event display (upper right) shows reconstructed tracks pointing to the collision. The BBC (upper left) confirms that the collision occurred near the center of the PHENIX detector system. The EMCal displays (lower left) show the energy deposited by particles coming from the collision.

図 10 PHENIX での最初の金 金衝突イベント

これは大人げないことなのだろうが、記念すべき「最初のイベント」の場面には居合わせたいものである。それが、他の実験から何日か遅れであったとしても。しかし、なかなかそうはいかない。私自身は「最初のイベント」の瞬間は PHENIX のコントロールルームにいなかった。大西氏などは、約 2 週間にわたりほとんど毎日徹夜の状態ですべての調整をし、12 日の夜などは STAR の衝突発見のニュースを悔しい思いで見ながら朝まで BBC のタイミングが外れていないかとチェックと調整を続けていた。14 日の夜は、BBC のタイミングを完璧に合わせて衝突を待っていたのだが、連日の疲れで 15 日の午前 4 時ころ、ビーム待ちの状態のとき疲れ切って帰ってしまい「最初のイベント」を逃した。一方、同じ BBC グループの広島大院生の小浜武士氏は、いつもよりだいぶ早く、シフトでもないのに午前 4 時頃コントロールルームに現れ、そのまま「最初のイベント」に居合わせた。彼がその場にいたのは幸いで、最初のイベントが見つかったとき、急いで BBC の解析をしてこれがビーム・ビーム衝突であることの確認に一役買った。図 10 の BBC のヒットパターンは小浜氏のプログラムで描かれたものである。聞くところによると、その朝、彼の夢枕に RHIC が立ったので起きてきたそうだが、これは冗談なのだろう。当日 BNL にいた約 20 人の日本人 PHENIX メンバーのなかでは、この他に筑波大の佐藤進氏、筑波大院生の清道明氏などがコントロールルームで「最初のイベント」をとらえた。

一旦ビーム衝突が起ると、「最初のイベント」まであれほど苦労していたのがうそのように、多数の衝突が記録されるようになる。15 日夜までには、数百の衝突イベント候

補が記録される。トリガーの質も向上し、ビーム・ビームトリガーへのビーム・ガスの混入がほとんど見られなくなる。ビーム衝突イベントを使っての測定器や読み出し回路の調整をしようとしているグループもいる。最初のイベントからまだ半日余りしか経っていない。

15 日夜には、BRAHMS でもビーム・ステアリング調整が行われて衝突が確認され、4 衝突点すべてで衝突が達成された。加速器の運転が始まって以来わずか 2 ヶ月半。RHIC のように、2 重リングでしかも超電導という極めて複雑な加速器システムとしては、これは記録的に速い立ち上げである。

RHIC での最初の衝突が実現し、PHENIX でも最初のイベントを観測することが出来た。2000 年度 RUN は、9 月半ばまでのビームタイムが予定されている。まだ全ての部分が完成し、稼動しているわけではないが、長い建設が終わり、まったく新しいエネルギー領域での高エネルギー重イオン物理実験が始まろうとしている。

7. 終わりに

今回、私が RHIC と PHENIX 実験について紹介する記事を書く機会をいただきましたが、RHIC と PHENIX は、それぞれ多くのプロジェクト・メンバーの長期にわたる努力と、関係する多くの方々のご理解とご協力の結果実現したものです。PHENIX 実験は、日米科学技術協力事業（高エネルギー物理学）、科研費特別推進（筑波大）理化学研究所スピン物理研究プログラムなどからサポートを受けています。PHENIX 実験に参加している一人として、深く感謝いたします。

参考文献

- [1] QGP と高エネルギー重イオン物理の最近の結果は Quark Matter 国際会議の Proceedings から知ることが出来る。
Nucl. Phys. A661 (1999) 1c (Quark Matter 99)
Nucl. Phys. A638 (1998) 1c (Quark Matter 97)
- [2] 最近の lattice QCD の結果については、たとえば
A.Ukawa, Nucl. Phys. A638 (1998) 339c.
- [3] J. D. Bjorken, Phys. Rev. D27(1983)140.
- [4] QGP のシグナルについては、例えば
S. A. Bass et al, J. Phys. G25(1999)R1.
S. A. Bass et al, in QM99 proceedings (ibid)
- [5] T. Alber et al., Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 3814
- [6] E. Andersen et. al. Phys. Lett. B449 (1999) 401
- [7] G. Agakichiev et al., Phys. Lett. B422 (1998) 405
- [8] T. Masui and H. Satz, Phys. Lett. B178 (1986) 416
- [9] M. C. Abreu et al. Phys. Lett. B477 (2000) 28.
- [10] R. Baier et al., Nucl. Phys. B484(1997) 265
- [11] M. M. Aggarwal et al., nucl-ex/0006008 (2000)